

УДК 620.179.13

С.В. ЕПИФАНОВ¹, А.В. ОЛЕЙНИК¹, В.Г. ПЕРЕТЁРТОВ¹, А.Г. ЧУМАКОВ²

¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

²Московское машиностроительное производственное предприятие «Салют», Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА В ОХЛАЖДАЕМОЙ ЛОПАТКЕ ТУРБИНЫ

Использование теплового контроля охлаждаемых лопаток турбин позволяет проводить оценку качества системы охлаждения лопаток, путем сравнения их тепловых динамических характеристик. В работе приведен метод теплового контроля, основанный на теории регулярного теплового режима. Специфическая геометрическая форма некоторых деталей, может приводить к отсутствию наступления регулярного режима, тем самым, ограничивая применимость теплового контроля. В работе проведено исследование режима охлаждения лопатки турбины с вихревым способом интенсификации охлаждения в процессе нестационарного теплового контроля. В качестве исходных данных для исследования были взяты результаты теплового технологического контроля лопаток на установке СТКЛ-1 ФГУМП «Салют».

лопатка турбины, компланарные каналы, тепловая дефектоскопия, тепловой контроль, регулярный режим, показатель регулярного режима, темп охлаждения

Введение

В связи с конструктивной сложностью и с относительно высоким гидравлическим сопротивлением охлаждаемых лопаток турбин с кампланарными каналами (рис. 1), а также в связи с технологическими факторами производства и эксплуатации лопаток, состояние охлаждающих каналов лопатки может существенно ухудшаться. Появляются засорения каналов и налет на стенках охлаждающих каналов.

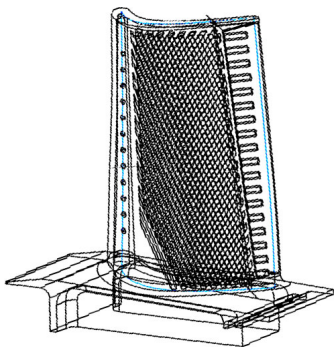


Рис. 1. Модель лопатки турбины с кампланарными каналами

Образование эксплуатационных дефектов обусловлено наличием мелкодисперсных включений атмосферой пыли и продуктов износа двигателя в хладагенте. Пыль и продукты износа двигателя оседают на стенках каналов лопатки, образуя отложе-

ния, которые препятствуют теплообмену. Результаты проведенных исследований указывают на необходимость периодической очистки охлаждающих каналов от пылевых отложений и введения технологического контроля расходно-тепловых характеристик лопаток [1].

Тепловой технологический контроль лопаток

Контроль эффективности охлаждения лопаток турбин можно проводить с помощью тепловидения, используя теорию регулярного теплового режима, сравнивая темпы охлаждения изготовленной либо эксплуатируемой лопатки с эталонной, т.е. удовлетворяющей расчетной эффективности охлаждения как вдоль профиля, так и по длине [2].

Для этого лопатка устанавливается на стенде, нагревается, продувается холодным воздухом. Приемник теплового излучения фиксирует нестационарное распределение температуры [3].

Регулярный режим охлаждения

Процесс охлаждения лопатки характеризуется двумя стадиями.

Первая стадия изменения температурного поля во времени существенно зависит от особенностей начального теплового состояния лопатки, поэтому характер процесса не определяется однозначно условиями охлаждения и свойствами тела.

Вторая стадия характеризуется уменьшением влияния начальных условий на процесс охлаждения; напротив воздействие условий охлаждения и физических свойств тела становится определяющим. Наступает регулярный тепловой режим. При этом закон изменения температурного поля во времени принимает простой и универсальный вид (1):

$$v = A \cdot C(x, y, z) \cdot e^{-\tau/t}, \quad (1)$$

где A – коэффициент, характеризующий начальными условиями охлаждения лопатки; $C(x, y, z)$ – коэффициент, зависящий от точек лопатки; t – коэффициент при экспоненте, характеризующий время процесса охлаждения, темп охлаждения; τ – время; v – избыточная температура лопатки.

Часто вместо коэффициента t в формуле (1) используют коэффициент регулярного режима m , где $m = 1/t$ и формула (1) приобретает следующий вид:

$$v = A \cdot C(x, y, z) \cdot e^{-m \cdot \tau}. \quad (2)$$

Величина m не зависит от координат и времени и характеризует интенсивность охлаждения лопатки [3].

Применительно к охлаждаемой лопатки турбины регулярный закон охлаждения можно представить в следующем виде:

$$t_i - t_0 = (t_{i0} - t_0) e^{-m(\tau_i - \tau_0)}, \quad (3)$$

где t_i – текущее значение температуры в i -ой точке; t_{i0} – начальная температура в i -ой точке; t_0 – температура охлаждающего воздуха; $\tau_i - \tau_0$ – интервал времени охлаждения между начальной температурой t_i и температурой t_0 ; m – темп охлаждения 1/час.

С другой стороны, согласно теории регулярного режима, темп охлаждения определяется формулой

$$m = \psi \frac{F}{Vc\gamma} \alpha, \quad (4)$$

где Ψ – коэффициент пропорциональности, означающий отношение средней температуры поверхности к средней температуре в объёме тела; F – площадь охлаждаемой поверхности; V – объём тела; γ – удельный вес; c – теплоёмкость тела; α – коэффициент теплоотдачи.

Для тела постоянной геометрической формы темп охлаждения зависит от Ψ и α . Величина Ψ для заданной формы тела является однозначной функцией критерия $B_{j0} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$, где α – коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности тела; l – характерный линейный размер.

Таким образом

$$m = f(\alpha). \quad (5)$$

Величина α определяется из критериального уравнения теплообмена вида

$$Nu = \text{const } f(\text{Re})^x. \quad (6)$$

Или после соответствующих преобразований получим

$$\alpha = f\left(\frac{G_{\text{охл}}}{\mu}\right), \quad (7)$$

где G – расход охлаждающего воздуха; μ – коэффициент вязкости охлаждающего воздуха.

Таким образом, результаты экспериментального определения темпа охлаждения можно представить в виде зависимости

$$m = f(G_{\text{охл}}/\mu). \quad (8)$$

В процессе продувки лопатки, расход охлаждающего воздуха линейно зависит от давления, а давление в свою очередь линейно изменяется относительно времени, таким образом, пренебрегая изменением вязкости воздуха, темп m можно представить так:

$$m = -A \cdot \tau + B, \quad (9)$$

где A и B – коэффициенты линейной аппроксимации; τ – время.

Окончательно формулу (2) можно представить:

$$T_{jL} = T_0 + C \cdot e^{-\tau \cdot (-A \cdot \tau + B)}. \quad (10)$$

С помощью установки теплового контроля в лаборатории тепловидения «ММПП «Салют» проводилась серия экспериментов по контролю охлаждаемых лопаток с кампланарными каналами. В процессе испытания регистрируется давление на входе в лопатку. Выбирается интервал давлений для охлаждающего воздуха, соответствующий сверхзвуковому режиму продувки для осуществления регулярного теплового режима.

В результате были получены нестационарные температурные характеристики поверхности лопаток [2].

Исследование регулярного режима и его характеристик

В работе проводились исследования процесса регулярного режима, путем анализа и преобразования тепловых динамических характеристик лопатки турбин.

На рис. 2 представлено температурное поле лопатки в начале процесса охлаждения и показаны точки, в которых производился анализ регулярного теплового режима. Расположение точек выбрано таким образом, чтобы исследовать режим охлаждения во всех зонах лопатки.

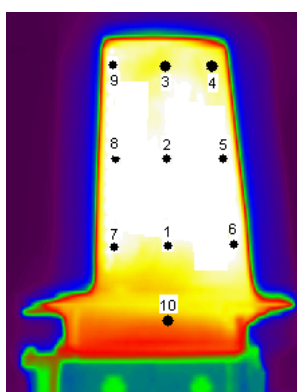


Рис. 2. Тепловое поле лопатки

В каждой точке лопатки существует экспериментально полученное динамическое изменение температуры в процессе охлаждения (рис. 3).

Эту экспериментальную информацию необходимо аппроксимировать экспоненциальной зависимостью, в соответствии с теорией регулярного режима.

Аппроксимация проводилась с использованием экспоненциальной функции (10).

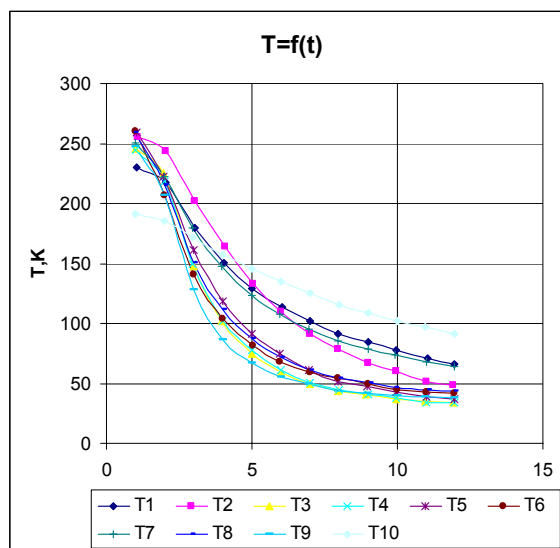


Рис. 3. График функции $T_{изб} = f(t)$

Значения полученных коэффициентов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения полученных коэффициентов

$$T_{II} = T_0 + C \cdot e^{-\tau \cdot (-A\tau + B)}$$

№т.	T_0	C	A	B	R^2	Chi^2
1	39,9	298	0,0057	0,266	0,99	1,36
2	40,9	312	0,099	0,189	0,99	1,31
3	31,5	556	0,0084	0,55	0,99	0,57
4	30,8	510	0,0080	0,52	0,99	1,22
5	31,3	421	0,0042	0,41	0,99	0,86
6	34,7	491	0,0177	0,55	0,99	1,77
7	44,7	321	0,0067	0,31	0,99	0,43
8	38,6	453	0,0091	0,49	0,99	0,26
9	34	662	0,0253	0,73	0,99	0,38
10	70,8	145	0,0041	0,111	0,99	0,07

В таблице R^2 – коэффициент смешанной корреляции, статистическая мера согласия, с помощью которой можно определить, насколько согласовано рассчитанное уравнение регрессии с фактическими данными; Chi^2 – критерий минимума «хи-квадрат».

Аппроксимация выполнена с достаточно высокой точностью. Коэффициент смешанной корреляции 0,99 по всей поверхности лопатки.

Значения в таблице коэффициента T_0 в некотором приближении соответствует температуре окру-

жающей среды ($\approx 30^\circ\text{C}$). Коэффициент C соответствует произведению начальной температуре нагрева лопатки и коэффициента, зависящего от координат точки

$$C = T_n \cdot k(x, y, z). \quad (11)$$

Учитывая, что начальная температура нагрева T_n составляет 260°C , значения коэффициента k лежат в пределах $1,1 \div 2,5$. Согласно формуле (8), распределение коэффициента регулярного режима представляет собой линейную зависимость от времени процесса охлаждения. Коэффициент m убывает, что связано с уменьшением расхода воздуха, а следовательно, и интенсивности теплообмена в лопатке. График распределения m представлена на рис. 4.

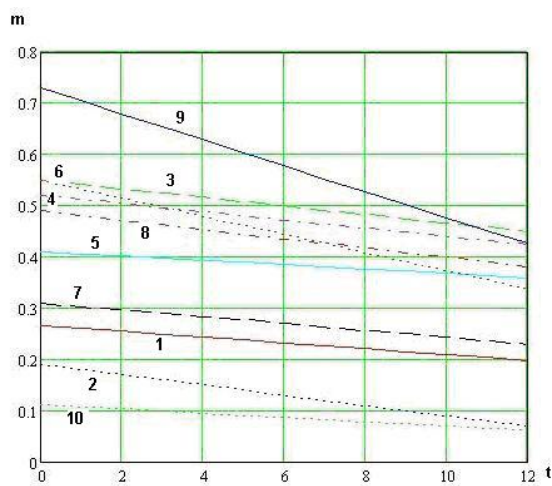


Рис. 4. Темп охлаждения

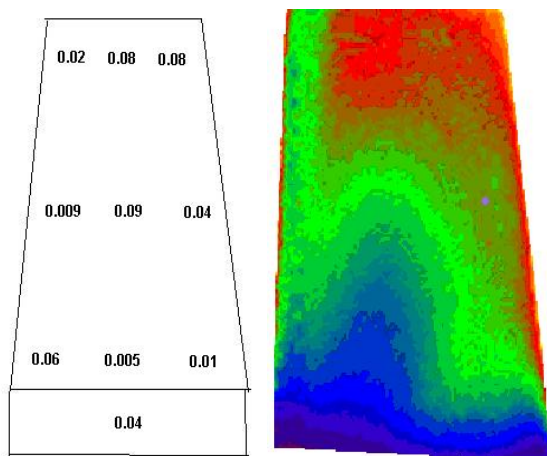


Рис. 5. Поле интенсивности охлаждения лопатки

По тангенсу угла наклона соответствующих линий можно диагностировать эффективность охлаждения точек лопатки.

$$u = \operatorname{tg}(m) = \frac{dm}{dt} = A. \quad (12)$$

Таким образом, сравнивая показатели интенсивности охлаждения в каждой точке, согласно координатам, для эталонной и контролируемых лопаток, определяются дефектные точки.

На рис. 5 показано поле показателей интенсивности охлаждения.

Вывод

Для исследуемых точек лопатки значение коэффициентов интенсивности охлаждения U лежит в пределах $0,004 - 0,02$. Режим охлаждения в лопатке квазирегулярный, т.е. регулярный режим в лопатке реализуется дискретно согласно геометрическим участкам лопатки. Характерные зоны лопатки с одинаковыми темпами охлаждения показаны на рис. 3.

Литература

1. Тепловые и гидравлические характеристики охлаждаемых лопаток газовых турбин / С.З. Копелев, М.Н. Галкин и др. – М.: Машиностроение, 1993. – 176 с.
2. Контроль качества охлаждаемых лопаток турбин методом продувки / С.И. Мельник, В.А. Стороженко, А.Г. Чумаков, А.Н. Шутов // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: ХАИ. – 2002. – Вып. 34. – С. 37-41.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. – М.: Энергия, 1997. – 344 с.

Поступила в редакцию 12.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.